

Changement prévu de la définition du mètre

par J. TERRIEN,

Directeur honoraire

du Bureau International des Poids et Mesures
Pavillon de Breteuil, 92310 Sèvres.

La définition du mètre actuellement en vigueur a été adoptée par la Conférence Générale des Poids et Mesures à sa session de 1960. On sait que le mètre ainsi défini est 1 650 763,73 fois la longueur d'onde dans le vide d'une radiation atomique, désignée par ses termes spectraux $2p_{10}$ et $5d_5$, de l'isotope 86 du krypton. Il est à peu près certain que la Conférence Générale, à sa session de 1983, changera encore une fois la définition du mètre. Pourtant, cette définition permettait déjà de gagner un facteur d'environ cent sur la précision des mesures de longueur ; elle avait le caractère rassurant de s'appuyer sur un étalon naturel invariable par nature, et non plus sur une règle en platine iridié qui pourrait être détruite, ou varier par vieillissement du métal ; et elle était, grâce à sa précision estimée initialement à 10^{-8} , en réalité deux ou trois fois meilleure, largement suffisante pour tous les besoins pratiques, actuels ou prévisibles. Quelles sont donc les raisons de l'abandonner ? Le désir d'un changement résulte de développements récents concernant l'emploi des lasers à gaz et la mesure précise de la vitesse de la lumière.

1. LES LASERS ASSERVIS.

On sait que la lumière émise par un laser est produite par émission stimulée (on dit aussi émission induite), et non pas par *émission spontanée*. Dans l'émission spontanée, la plus courante, un atome (ou une molécule, ou un ion) préalablement excité, puis livré à lui-même, retombe à un niveau d'énergie quantifié d'énergie plus basse. Dans l'*émission stimulée*, l'atome passe encore d'un niveau à un niveau inférieur, mais sous l'action d'un rayonnement ayant la fréquence de la transition : c'est l'inverse du phénomène d'absorption, où le rayonnement incident provoque la transition d'un niveau à un niveau inférieur. Pour qu'un laser fonctionne, il faut donc au préalable porter les atomes au niveau excité de départ de la transition, donc apporter de l'énergie d'une façon appropriée. Il faut aussi que le rayonnement « stimulant » ait une énergie volumique suffisante, ce que l'on obtient en

enfermant le gaz dans une « cavité » (terme emprunté aux radio-électriciens) constituée par deux miroirs face à face où le rayonnement est confiné par des réflexions multiples analogues à celles d'un étalon PEROT-FABRY.

Un premier fait remarquable est que le rayonnement émis par l'atome est *en concordance de phase* avec le rayonnement qui a stimulé la transition, et augmente l'amplitude de cette onde : le laser est un amplificateur ; et il émet un rayonnement dit cohérent par suite de la concordance de phase.

Le second fait remarquable concerne la largeur spectrale de la raie émise. Tandis que les atomes d'une lampe à décharge dans un gaz émettent des raies élargies par effet DOPPLER-FIZEAU d'agitation thermique, avec une largeur qui, dans le cas favorable d'une lampe à krypton refroidie, est de l'ordre du millionième de la longueur d'onde, une raie laser peut avoir une largeur bien plus petite, mille fois par exemple. La raison en est que le rayonnement stimulant a le profil spectral étroit que donne un étalon PEROT-FABRY, à une longueur d'onde commandée par l'intervalle entre les miroirs de la cavité. Ce rayonnement ne provoque la transition que sur une petite fraction des atomes, ceux dont la composante de vitesse longitudinale (parallèle à l'axe des deux miroirs) déplace la longueur d'onde propre (qui serait émise au repos) et l'amène en coïncidence avec la longueur d'onde du rayonnement stimulant.

Une raie d'un laser à gaz peut donc être plus avantageuse en métrologie interférentielle que la raie étalon du krypton 86, grâce à sa finesse spectrale qui permet de produire des interférences bien contrastées à des différences de marches plus grandes, dépassant de beaucoup les 80 cm accessibles avec la raie d'une lampe à krypton refroidie à $T = 63$ K. Mais une telle raie laser est un étalon de longueur médiocre, dont les variations en longueur d'onde sont soumises à celles de l'intervalle entre les miroirs de la cavité, et de l'indice de réfraction du gaz qui y est contenu.

On a trouvé dans le phénomène d'*absorption saturée* le moyen d'asservir l'intervalle entre les miroirs de façon que la longueur d'onde émise soit stabilisée, ses variations étant alors réduites à 10^{-10} ou 10^{-11} (à comparer à la reproductibilité de la radiation du krypton, environ 4×10^{-9}). On introduit pour cela dans la cavité laser une cuve d'absorption contenant un gaz moléculaire dont une des raies d'absorption (elles sont nombreuses dans leur spectre de bandes) a une longueur d'onde qui coïncide exactement avec celle de la raie laser. Ce gaz absorbant est à une pression assez faible pour que le laser continue à fonctionner ; mais, à cause de la grande énergie volumique du rayonnement qu'il reçoit, une partie de ses molécules sont portées momentanément de leur

état d'énergie normal à un état d'énergie supérieure, et tant qu'elles restent à cet état excité, elles ne peuvent plus absorber : la population des molécules capables d'absorber est amoindrie, c'est l'absorption saturée. Là encore, comme les raies d'absorption sont élargies par l'effet DOPPLER d'agitation thermique, seules sont excitées les molécules dont la composante longitudinale de vitesse est appropriée pour faire coïncider la longueur propre de la molécule et la longueur d'onde du rayonnement incident.

Dans les ondes stationnaires de la cavité, le rayonnement se propage dans les deux sens ; il y a donc deux classes de molécules qui sont excitées, et l'absorption saturée se produit à deux longueurs d'onde voisines. Si l'on ajuste l'intervalle entre les deux miroirs de façon à amener la raie laser à la longueur d'onde propre des molécules, la restriction sur le sens de leur mouvement tombe, leur composante longitudinale de vitesse étant nulle, et deux fois plus de molécules sont portées au niveau supérieur à cette longueur d'onde unique. On constate en effet que, pour cet accord de la cavité, la puissance du rayonnement émis par le laser est augmentée, ce qui fournit un signal net lorsque l'on fait un balayage en imprimant à l'un des miroirs un léger mouvement alternatif qui fait varier l'intervalle entre les miroirs. On sait alors asservir la position de l'autre miroir de façon que l'oscillation du premier miroir soit centrée sur cet accord, et donc que la longueur d'onde du rayonnement laser soit asservie en coïncidence avec la raie d'absorption, sans élargissement DOPPLER d'agitation thermique. La stabilité et la reproductibilité d'un tel étalon de longueur d'onde est alors de 10^{-10} à 10^{-11} .

Pour mesurer cette longueur d'onde, on doit paradoxalement la comparer à un étalon qui est cent fois moins bien défini, l'étalon primaire λ (Kr), ce qui a été fait dans plusieurs laboratoires avec des résultats concordants à $\pm 3 \times 10^{-9}$ près, incertitude imposée par l'étalon krypton. Une valeur moyenne a été convenue internationalement, et sert d'étalon provisoire, en attendant une redéfinition du mètre. On dispose donc d'étalons de longueur, bien meilleurs que l'étalon primaire actuel du mètre. Ils sont pour le moment au nombre de quatre (Tableau 1) :

TABLEAU 1

Raies moléculaires utilisées pour l'asservissement de lasers
(1) à l'hélium-néon ; (2) à argon

laser	raie moléculaire	λ (vide), unité μm
(1)	Méthane, raie P (7), bande ν_3	3,392 231 40
(1)	Iode 127, raie R (127), bande 11-5, composante <i>i</i>	0,632 991 399
(1)	Iode 127, raie R (47), bande 9-2, composante <i>o</i>	0,611 970 771
(2)	Iode 127, raie P (13), bande 43-0, composante a_3	0,514 673 467

2. LA VITESSE DE LA LUMIERE (c).

Du fait même de leur définition, la longueur d'onde λ , la fréquence ν , et la vitesse de propagation c d'une onde sont reliées par la formule $c = \lambda\nu$. On peut donc mesurer c pour la lumière, en utilisant le rayonnement d'un laser asservi dont la longueur d'onde λ est déjà admise, si l'on sait mesurer sa fréquence ν . Mesurer une fréquence, c'est la comparer à celle qui définit la seconde, c'est-à-dire celle de la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'atome de césium à son état normal. Cette fréquence étalon est de l'ordre de $9 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ ($9\,192\,631\,770 \text{ s}^{-1}$) alors que la fréquence des rayonnements des lasers asservis est de l'ordre de $9 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ à $50 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$. Les fréquences à comparer sont donc dans un rapport supérieur à 10 000 et c'est là la difficulté. Ce n'est que depuis 1972 qu'on est parvenu à le mesurer, en utilisant les harmoniques d'une série d'oscillateurs de fréquence intermédiaire.

TABLEAU 2

Exemples d'oscillateurs de fréquence croissante

	ν (Hz = s ⁻¹)	λ
Césium (étalon)	9 192 631 770	32,6 cm
Klystrons	jusqu'à environ 100×10^9	0,3 cm
laser HCN	890×10^9	337 μm
laser H ₂ O	$3,8 \times 10^{12}$ et $10,72 \times 10^{12}$	78 μm et 28 μm
laser CO ₂	29×10^{12} et 32×10^{12}	10,4 μm et 9,4 μm
laser CH ₄	88×10^{12}	3,39 μm

Le résultat, maintenant bien confirmé, est la fréquence du rayonnement d'un laser hélium-néon asservi sur une raie d'absorption du méthane CH₄ : $\nu = 88\,376\,181\,627 \text{ s}^{-1}$, avec une incertitude de 6×10^{-10} . La longueur d'onde de cette même radiation, dans le proche infrarouge, ayant été fixée à $\lambda = 3,392\,231\,40 \times 10^{-6} \text{ m}$, le produit $h\nu = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ est la vitesse de la lumière c .

Depuis 1957, la valeur admise était $(299\,792,5 \pm 0,4) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Le gain en précision est donc 400, et l'on ne voit pas quelles erreurs pourraient se glisser dans la fréquence d'harmoniques qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale.

Cette valeur de c récemment obtenue peut être considérée comme définitive, c'est-à-dire que l'on est résolu à donner au mètre une définition qui imposera à la vitesse de la lumière cette valeur par convention.

3. LA FUTURE DEFINITION DU METRE.

La nouvelle définition du mètre qui sera soumise à la décision de la Conférence Générale des Poids et Mesures en 1983 n'est pas encore rédigée dans son texte définitif, mais elle sera à peu près la suivante :

« Le mètre est la longueur du trajet parcouru par
« une onde électromagnétique plane pendant la durée de
« 1/299 792 458 seconde. ».

Cela équivaut à fixer par convention la valeur de la vitesse de la lumière. Autrement dit, les expériences que l'on appelait « mesure de la vitesse de la lumière » resteront indispensables et identiques, non plus pour mesurer c à partir du mètre et de la seconde, mais pour mesurer le mètre à partir de c et de la seconde. Les étalons de longueur dont on aura besoin ne seront plus déterminés à partir d'un étalon primaire tel que $\lambda(\text{Kr})$, ce seront des radiations monochromatiques, produites par des lasers asservis, dont on aura mesuré la fréquence par comparaison à $\nu(\text{Cs})$, et dont la longueur d'onde sera déduite de la relation $\lambda = c/\nu$.

Quelle sera l'incertitude du mètre ainsi défini ? Il n'y a pas d'incertitude sur c , dont la valeur est fixée par convention. L'incertitude sur la seconde, c'est-à-dire sur la fréquence d'une radiation que l'on compare à $\nu(\text{Cs})$, est de l'ordre de 10^{-13} dans les conditions optimales (lorsque l'on compare des fréquences de valeurs voisines). Pour comparer à $\nu(\text{Cs})$ la fréquence d'une radiation facilement utilisable pour la mesure interférentielle des longueurs, c'est-à-dire pour des interférences en lumière visible, on n'atteint pas encore, loin de là, la précision limite de 10^{-13} . Pour le moment, l'incertitude est de 6×10^{-10} sur la radiation à $\lambda = 3,39 \mu\text{m}$ du méthane, que l'on raccorde au visible par interférences optiques, ce qui augmente l'incertitude à 10^{-9} . C'est déjà trois ou quatre fois mieux que la définition actuelle de la longueur d'onde du krypton 86. D'actives recherches sont en cours, stimulées par l'attente de la nouvelle définition du mètre, et l'on disposera certainement à bref délai d'étalons de longueur d'onde, c'est-à-dire de lasers asservis, de plus en plus nombreux, commodes et précis, dont l'incertitude sera encore réduite.

Le principal attrait de cette prochaine définition du mètre est cette conséquence : la vitesse de la lumière ne sera plus une constante physique dont la valeur en mètres par seconde devrait être révisée à chaque nouvelle mesure expérimentale. Les astronomes en sont particulièrement satisfaits. Mais on fait aussi d'une pierre deux coups : fixer la valeur de c , et améliorer dès maintenant, avec la possibilité de grandes améliorations ultérieures, la précision de la définition du mètre.
